

# 微視的核構造反応モデルの進展状況

横浜国立大学 教育学部

古本 猛憲

共同研究者

須原唯広（松江高専）

板垣直之（大阪公大）

# Outline

1. これまでの我々の微視的核構造反応模型の成果
2. 最近の改良点
3. 今回の計算の設定と結果
4. まとめ

# 微視的核構造反応モデルとは

- 微視的に核構造と核反応を記述するモデル

- 我々のグループでは、

1. 微視的クラスターモデルで核構造を記述
2. その波動関数を用いて遷移密度を導出
3. 微視的畳み込みモデルで核反応を記述

という手順で核構造から核反応まで記述できるモデルの発展を行っている。

# 手法 (微視的核構造模型)

Brink model + Stochastic multi-configuration mixing

$$\phi^{JM} = \sum_{i,K} c_{i,K} \Psi_i^{JM,K}$$

Randomly fixed

$$\Psi_i^{JM,K} = P^\pi P^{JMK} [\mathcal{A} \{ \phi_{\alpha_1}(\mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2 \mathbf{r}_3 \mathbf{r}_4, \mathbf{R}_1) \phi_{\alpha_2}(\mathbf{r}_5 \mathbf{r}_6 \mathbf{r}_7 \mathbf{r}_8, \mathbf{R}_2) \phi_{n_1}(\mathbf{r}_9, \mathbf{R}_3) \phi_{n_2}(\mathbf{r}_{10}, \mathbf{R}_4) \}]$$

$$\phi(\mathbf{r}_j, \mathbf{R}_\gamma) = \left(\frac{2\nu}{\pi}\right)^{\frac{3}{4}} \exp[-\nu(\mathbf{r}_j - \mathbf{R}_\gamma)^2] \chi_j \quad \chi_j: \text{spin and isospin parts}$$

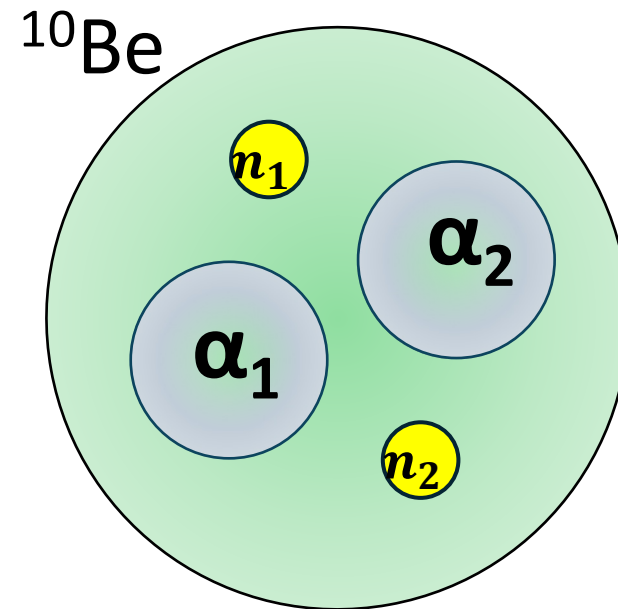
Hamiltonian

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^A \hat{t}_i - \hat{T}_{c.m.} + \sum_{i>j}^A \hat{v}_{ij}$$

$$\begin{aligned} \nu &= 0.235 \\ M &= 0.60 \\ B = H &= 0.08 \end{aligned}$$

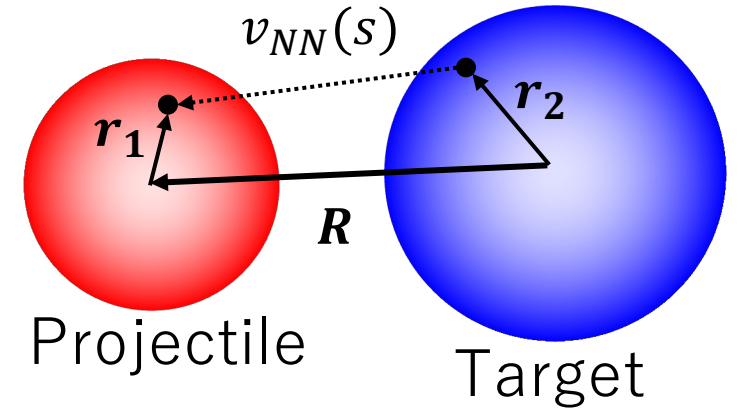
Effective  $NN$  interaction

$$\begin{aligned} \text{Central} &: \text{Volkov No.2 } (W = 1 - M) \\ &\quad (v_c(r)(W + BP_\sigma - HP_\tau - MP_\sigma P_\tau)) \\ \text{LS} &: \text{G3RS } (V_{LS} = 2000 \text{ MeV}) \end{aligned}$$



# 手法 (微視的核反應模型)

Microscopic Coupled Channel (MCC)



$$[T_R + U_{\alpha\alpha}(\mathbf{R}) - E_{\alpha}] \chi_{\alpha}(\mathbf{R}) = - \sum_{\beta \neq \alpha}^N U_{\beta\alpha}(\mathbf{R}) \chi_{\beta}(\mathbf{R})$$

The diagonal and coupling potentials are derived from microscopic viewpoint.

$$U_{\beta\alpha}(\mathbf{R}) = \int \rho_{ik}(\mathbf{r}) \rho_{jl}(\mathbf{r}) v_{NN}(\mathbf{s}; \rho, E) d\mathbf{r}$$

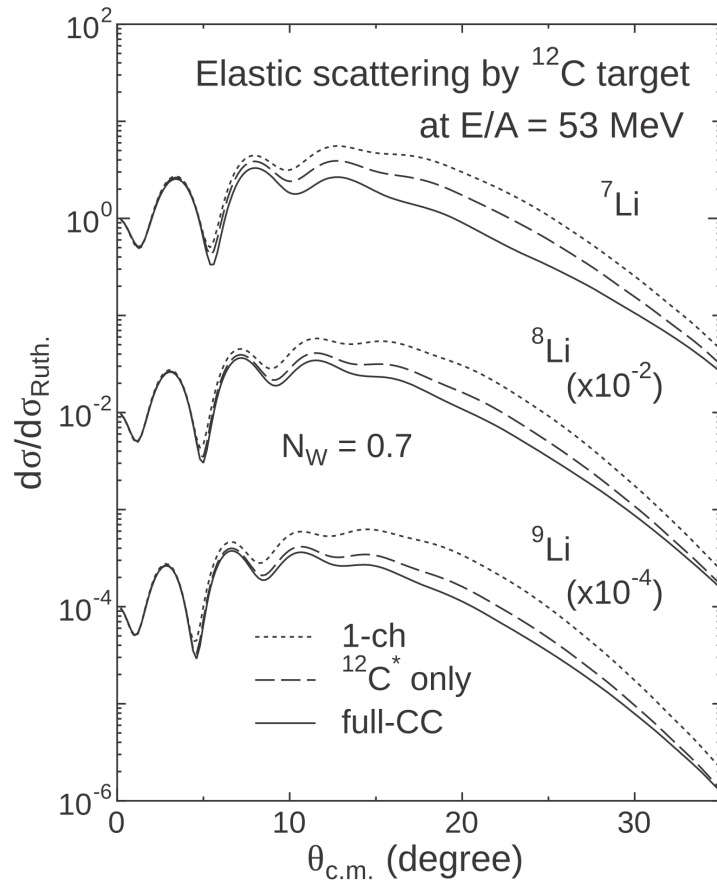
transition density

Complex G-matrix (MPa or CEG07)

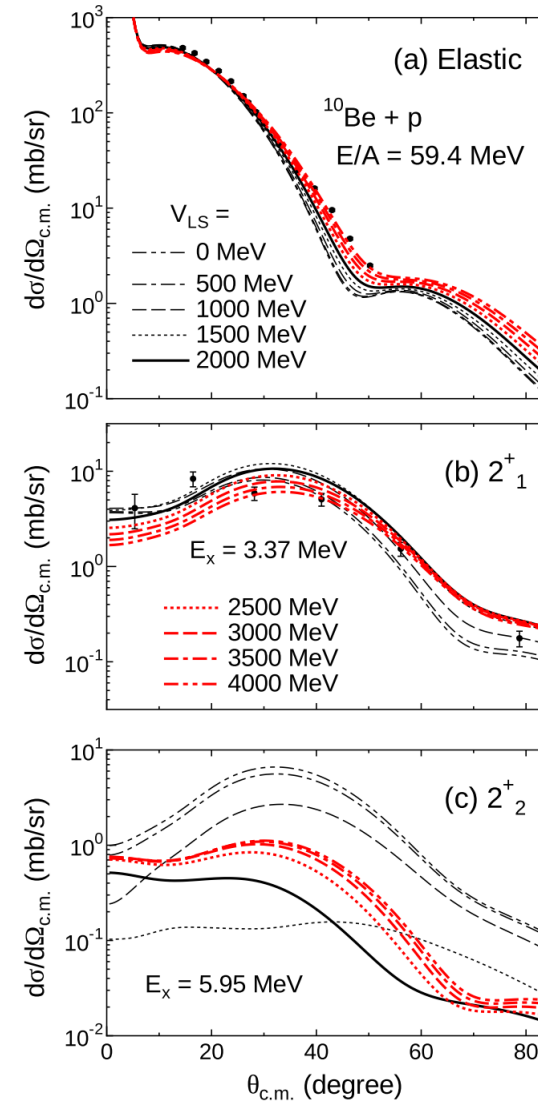
Transition density

$$\rho_{ik}(\mathbf{r}) = \langle \Phi_i(\xi) | \sum_m \delta(\mathbf{r}_m - \mathbf{r}) | \Phi_k(\xi) \rangle$$

# 我々の微視的核構造反応モデルによる成果



T. Furumoto+, PRC97, 044602 (2018)



T. Furumoto+,  
PRC104, 034613 (2021)

# 最近のアップデート状況

1. 微視的クラスターモデルの改良を行った。
2.  $\alpha$  散乱も扱えるようになった。

※今回話すことは微視的クラスターモデルの改良について

- これまで → Brinkモデル
- 今回 → Brinkモデル+AQCM

# Brink模型

- Single-particle wave function

$$\phi_i = \left(\frac{2\nu}{\pi}\right)^{\frac{3}{4}} \exp\left(-\nu(\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_\gamma)^2\right) \chi_i$$

スピン $\uparrow \downarrow$ の陽子と中性子を同じ波束中心 ( $\mathbf{R}_\gamma$ ) に取れば、 $\alpha$  クラスタを記述することができる。

ここで、 $\mathbf{R}_\gamma$  は実ベクトル。

# AQCM (Antisymmetrized Quasi-Cluster Model)

- Single-particle wave function

$$\phi_i = \left(\frac{2\nu}{\pi}\right)^{\frac{3}{4}} \exp(-\nu(\mathbf{r}_i - \boldsymbol{\zeta}_i)^2) \chi_i$$

ここで、 $\boldsymbol{\zeta}_\gamma$  は複素ベクトルとなっており、

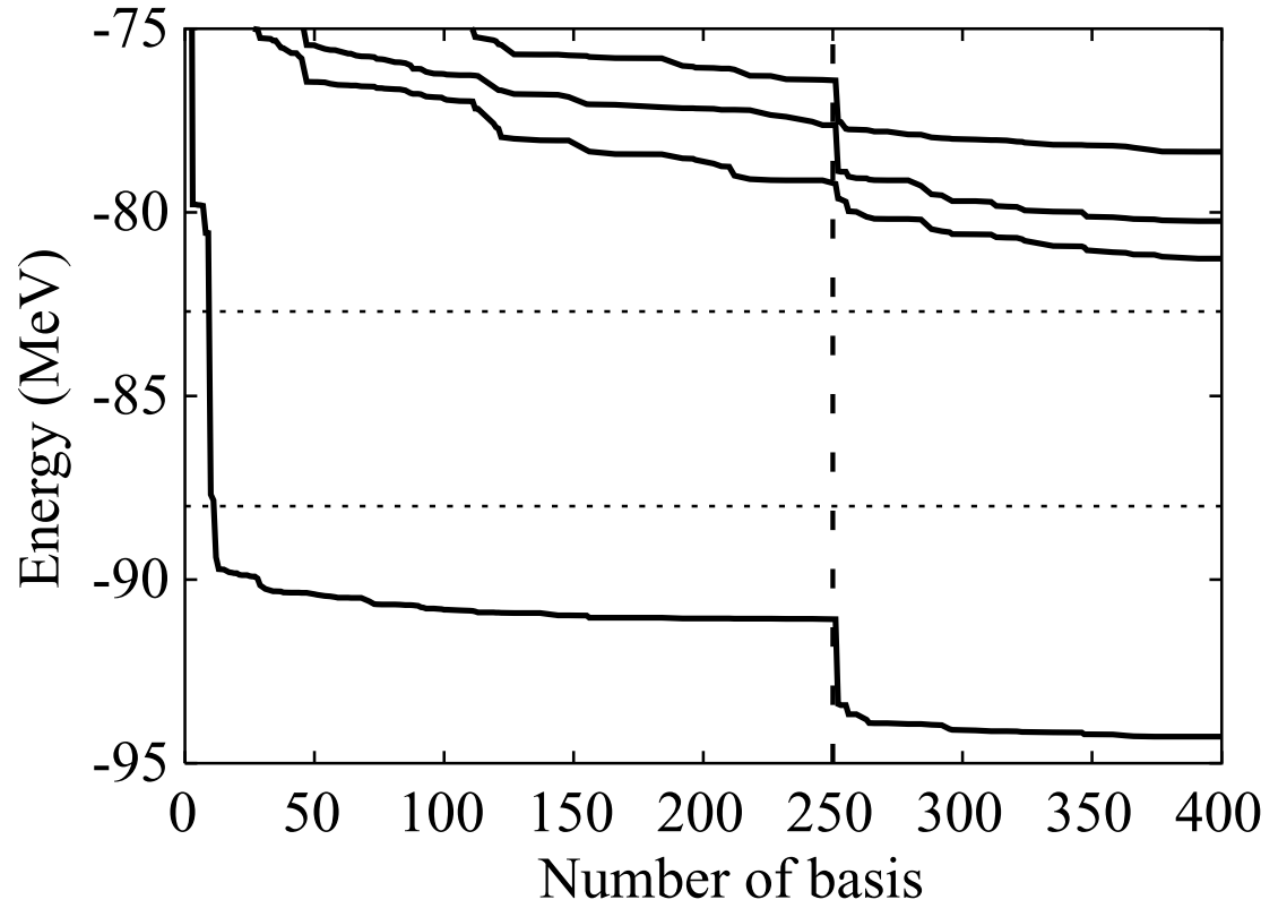
$$\boldsymbol{\zeta}_i = \mathbf{R}_\gamma + i\Lambda \mathbf{e}_i^{(\text{spin})} \times \mathbf{R}_\gamma$$

として与えられる。この虚部により、スピン軌道力を表現。結果、クラスターの壊れを表現することができる。

ここで、 $\Lambda$  はパラメータ。

# AQCMの計算例

- $^{13}\text{C}$
- $1/2^-$



# 改良AQCM ( $^{12}\text{C}$ において)

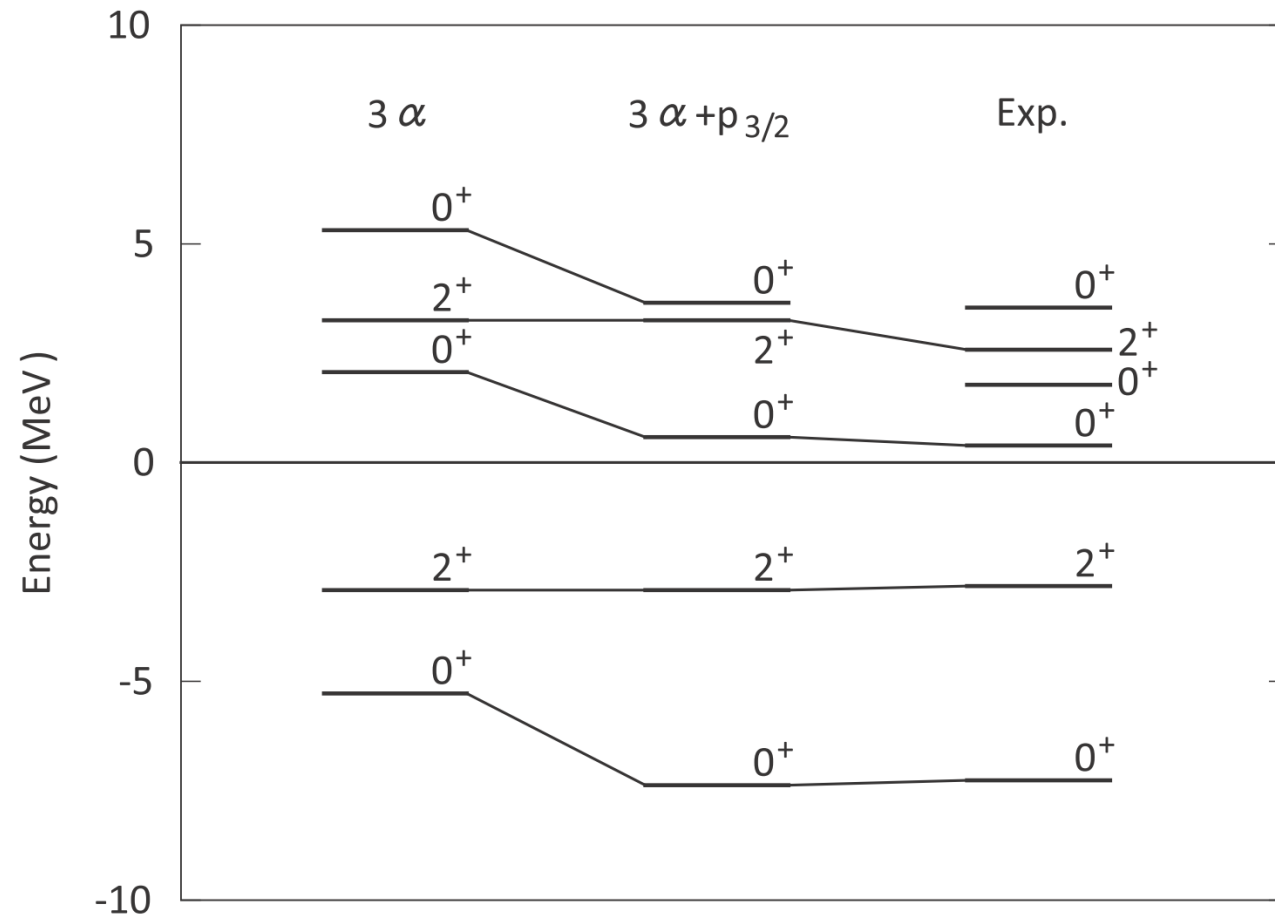
- Single-particle wave function

$$\phi_i = \left(\frac{2\nu}{\pi}\right)^{\frac{3}{4}} \exp(-\nu(\mathbf{r}_i - \boldsymbol{\zeta}_i)^2) \chi_i$$

ではあるが、スピン部分が主に違う。

1. 1つ目の $\alpha$ クラスターを作り、複素波束中心にする。
2. 残りの2つの $\alpha$ クラスターは、1つ目の $\alpha$ クラスターをスピン部分も含めて120度ずつ回転して作る。

# $^{12}\text{C}$ における改良AQCMの成功例



# 遷移密度

我々のモデルでは、以上の微視的核構造模型の情報を微視的畳み込み模型に反映するために遷移密度が必要となる。

- 遷移密度

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_{\lambda\mu} \langle J_1 M_1 \lambda \mu | J_2 M_2 \rangle \rho_{J_1 J_2}^{(\lambda)}(\mathbf{r}) Y_{\lambda\mu}^*(\Omega_{\mathbf{r}})$$

※AQCMの遷移密度を導出するのは今回が初めて。

# 今回の発表における構造計算について

<sup>12</sup>C

- $3\alpha + p_{3/2}$

※ただし、 $3\alpha$ を須原さんの計算とは変えている。

◎  $3\alpha$ 配位 (100ベース)

T. Ichikawa+, PRC 105, 024314 (2022)

→ replica exchange Monte Carlo (RXMC) method + something

◎ AQCM ( $p_{3/2}$ ) の1ベース

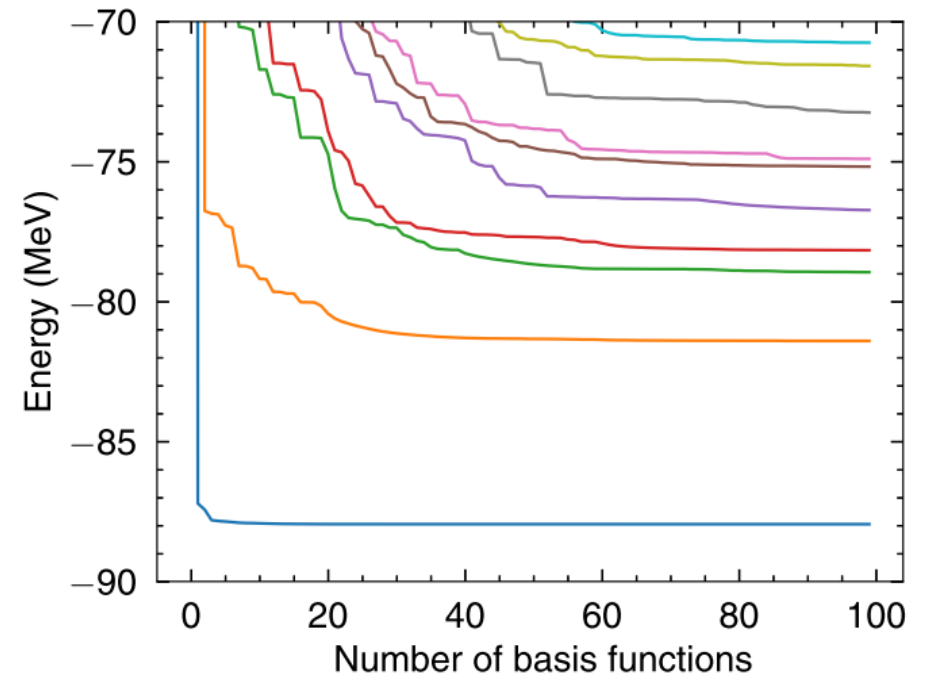
T. Suhara+, PRC91, 024315 (2015)

→  $(R, \Lambda) = (0.1, 1.0)$

☆計101ベース (基底状態とHoyleだけなら41ベースでも良い)。

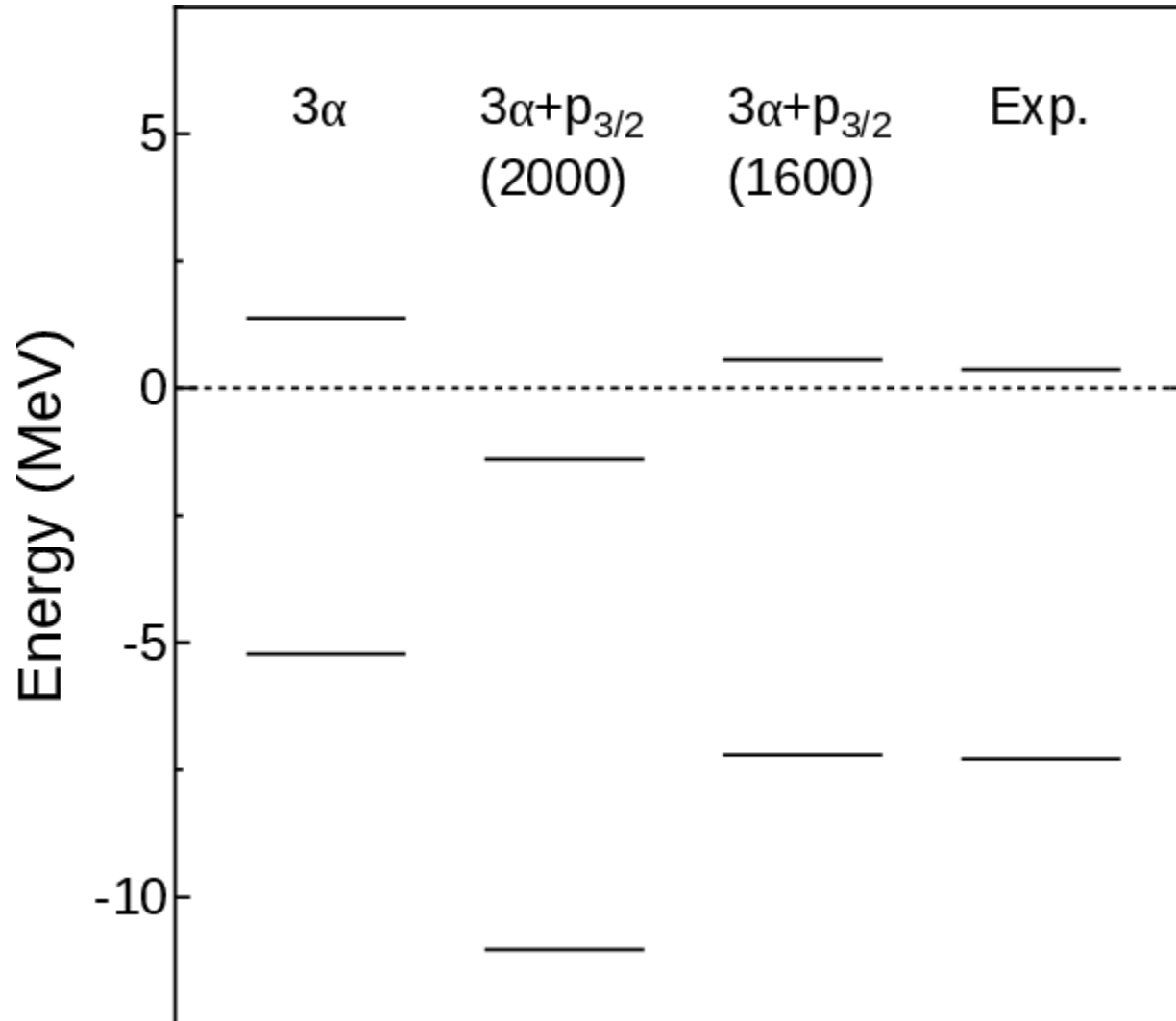
# RXMC method + something

- RXMC method
  - (準備された) 5,000ベースから、500ベースをランダムに抽出する。
- +something
  - 500ベースの中から各 $0^+$ 状態に最適化されるベースを20ベースずつ選ぶ ( $0_5$ 状態まで、計100ベース)

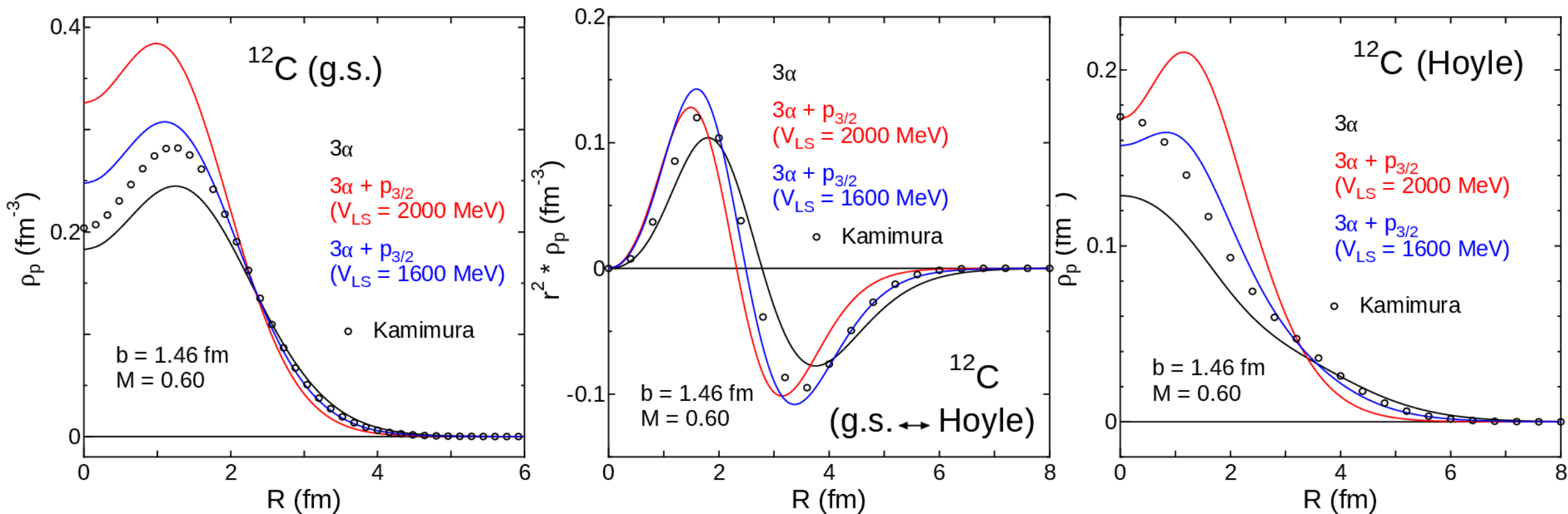


# 結果 (エネルギー)

- $^{12}\text{C}(0^+)$



# 結果 (遷移密度)

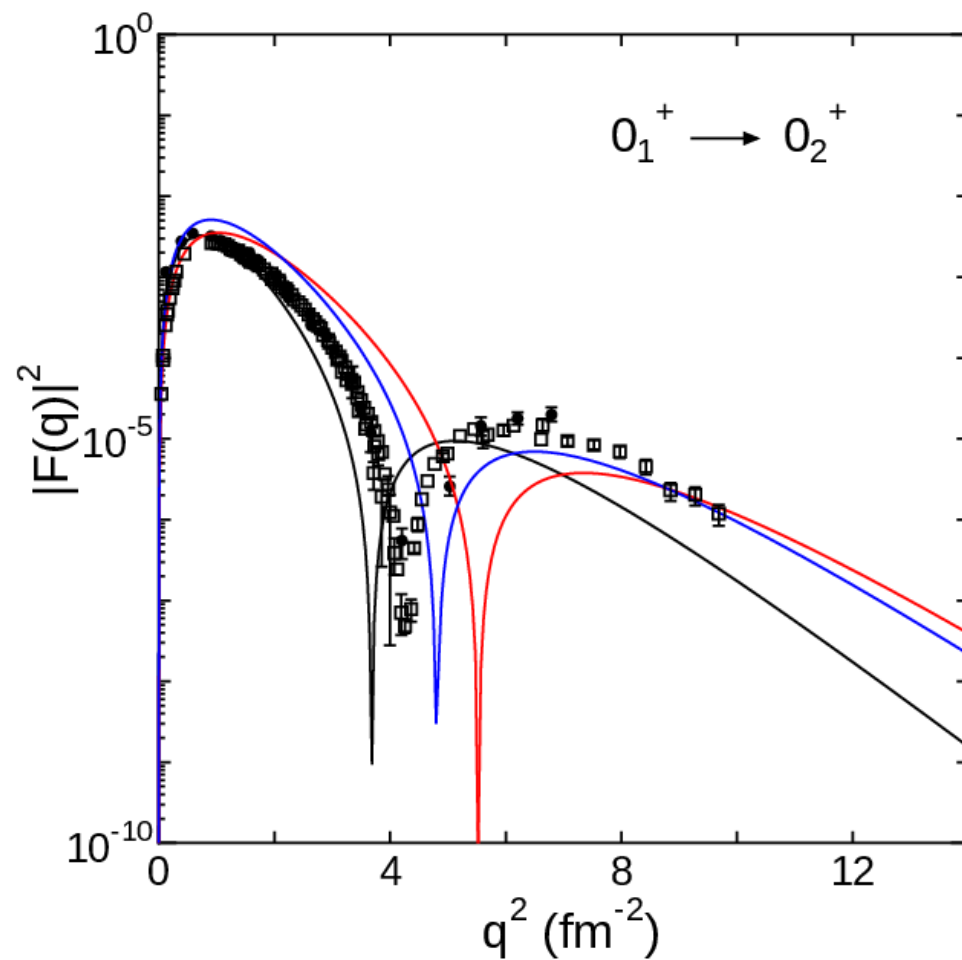
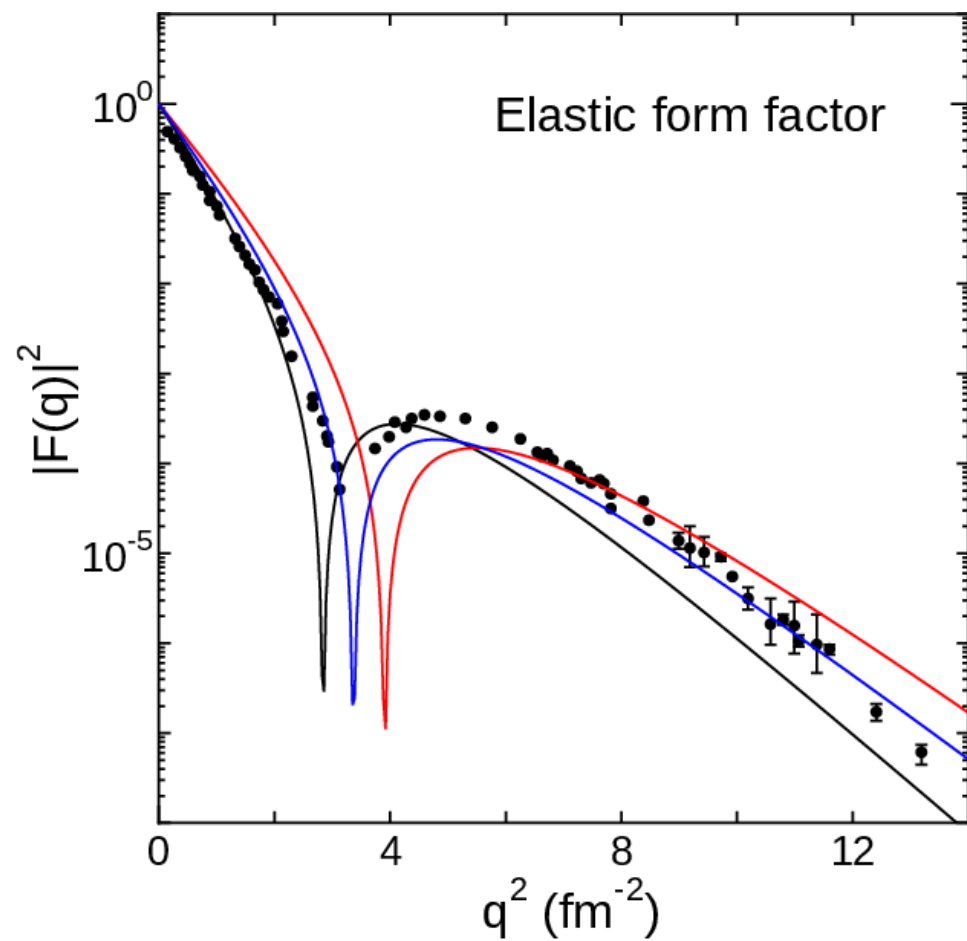


# 結果（半径や遷移強度など）

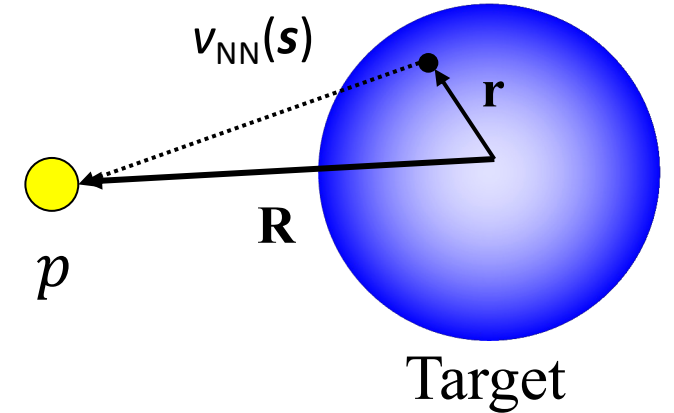
	半径 (g.s.) (fm)	半径 (Hoyle) (fm)	$B(E0)$ (e <sup>2</sup> fm <sup>4</sup> )
Experiment	2.35±0.02 2.31±0.02	-	29±2
3 $\alpha$	2.532	3.949	56.87
3 $\alpha$ + p <sub>3/2</sub> ( $V_{LS} = 2,000$ MeV)	2.193	2.796	30.10
3 $\alpha$ + p <sub>3/2</sub> ( $V_{LS} = 1,600$ MeV)	2.366	3.370	58.95

※10fmまでの密度を用いて計算

# 結果 (形状因子)



# 手法（微視的核反應模型）



Coupled-channel equation

$$[T_R + U_{\alpha\alpha}(\mathbf{R}) - E_\alpha]\chi_\alpha(\mathbf{R}) = - \sum_{\beta \neq \alpha}^N U_{\beta\alpha}(\mathbf{R})\chi_\beta(\mathbf{R})$$

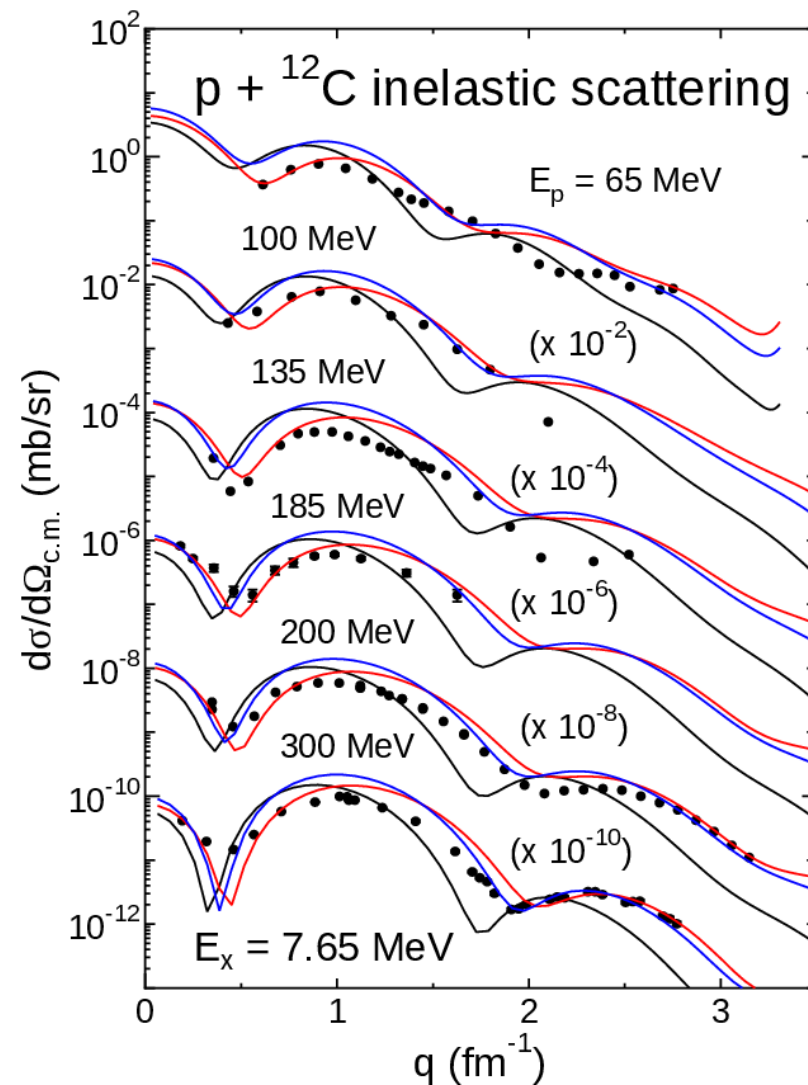
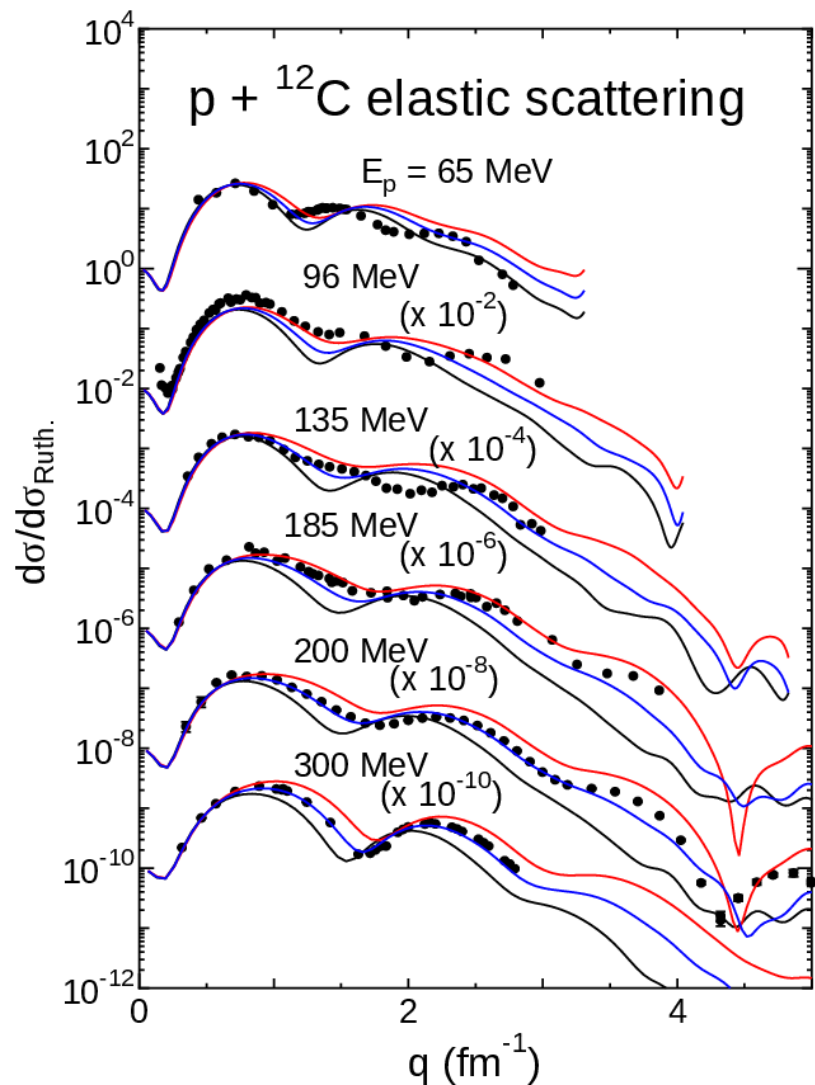
Single-folding model

$$U_{\beta\alpha}(\mathbf{R}) = \int \rho_{\beta\alpha}(\mathbf{r}) v_{NN}(\mathbf{s}; \rho, E) d\mathbf{r}$$

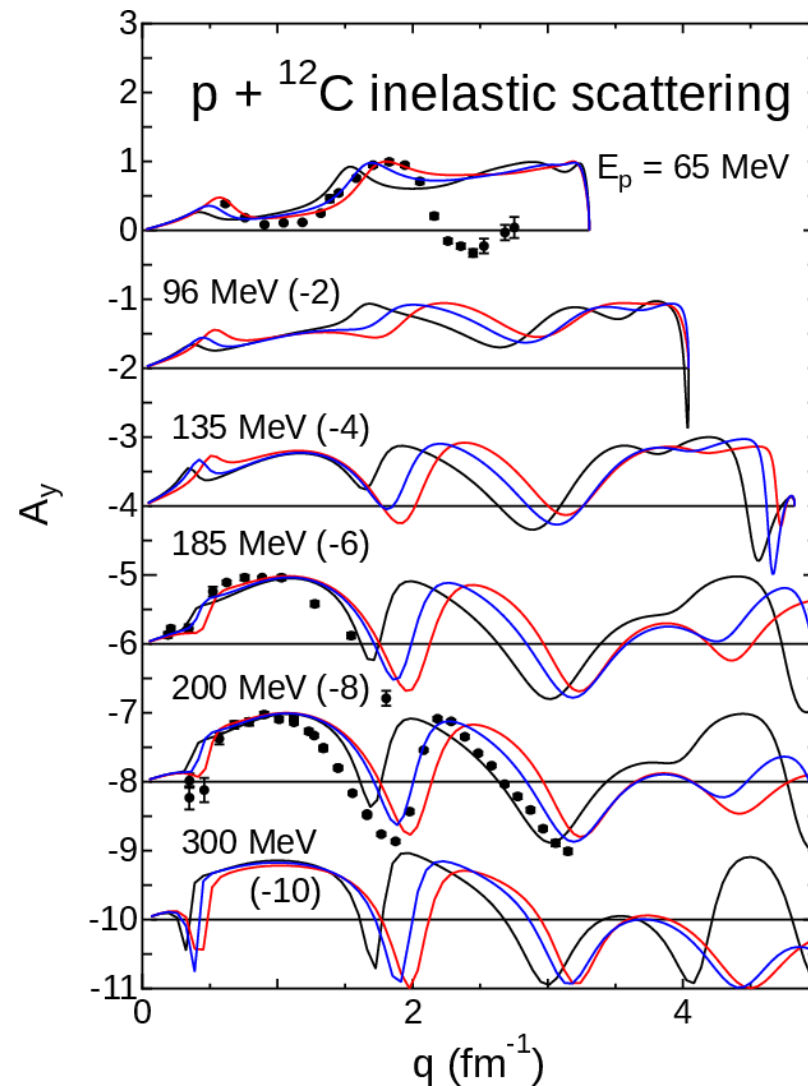
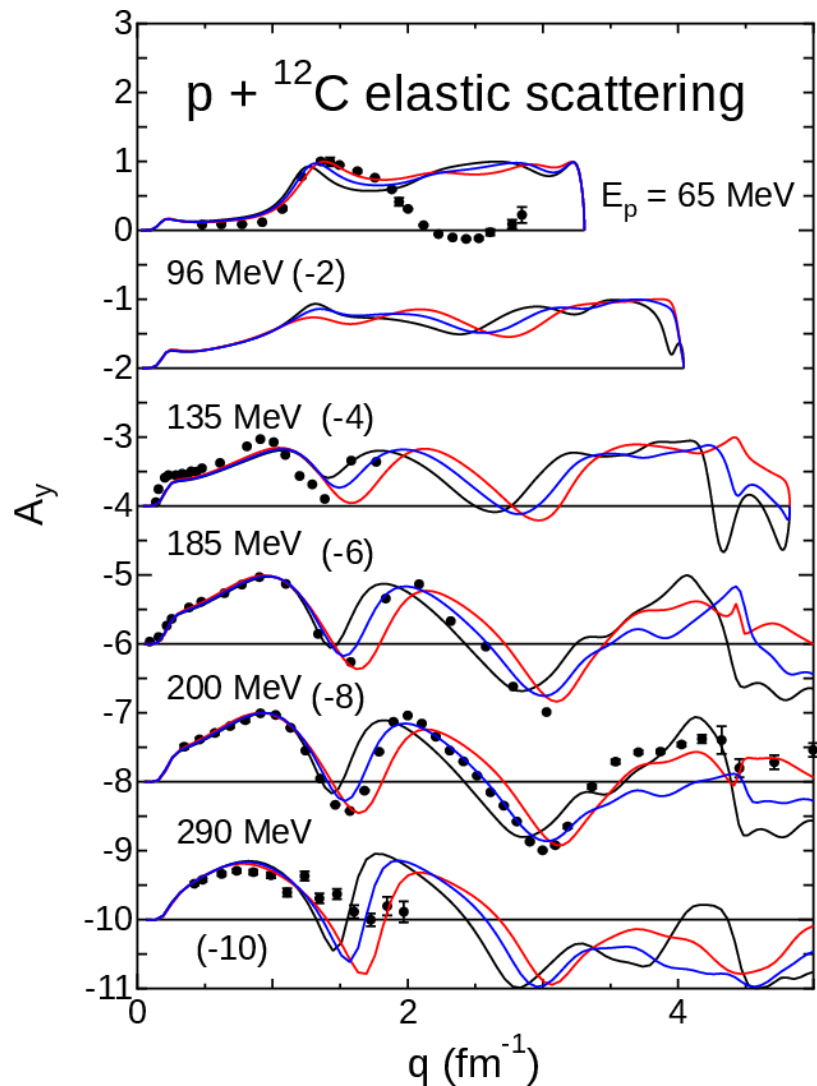
遷移密度

複素G行列相互作用 (MPa)

# 結果 (彈性 & 非彈性散乱断面積)



# 結果 (彈性 & 非彈性散乱偏極分解能)



# まとめ

- 微視的核構造核反応模型の改良を行い、AQCMを扱えそうなところまで拡張が進んでいる。
- 今回は、 $^{12}\text{C}$ 原子核の基底状態とHoyle状態に注目した。
- AQCMを用いて、 $3\alpha + p_{3/2}$  を記述し、遷移密度を導出した。
- 構造計算におけるスピン軌道力の大きさは2通り用いて調べた。
- 基底状態（弾性散乱）はよく記述できた。
- Hoyle状態（非弾性散乱）についてはまだ詳しく分析が必要。